

第 3 節 GSR 効果を活用した超高感度マイクロ磁気センサの開発 はじめに

ビッグデータ時代を迎えてセンサの大きな革新が進行している。磁気センサにおいても、高精度、高分解能、リアルタイム性に優れ、しかも低消費電流、ミニサイズで知能システムに適合できる高性能な超高感度マイクロ磁気センサの開発が進んでいる。その中で新しい磁気センサ原理 GHz-Spin-Rotation (以下 GSR) 効果が発見され、従来の MI センサ、TMR センサなどの高感度マイクロ磁気センサよりもさらに高感度の GSR センサの開発がすすんでいる。自動車用センサ、ウェアラブルコンピュータ用、生体磁気検出用、生体内位置検出センサなどの新しい応用が期待されている。本報告では、GSR 原理の紹介とその原理を活用した GSR センサの開発の現状と将来展望を明らかにする。

1. GSR センサの発見

1.1 アモルファス磁性材料を使った高感度磁気センサの開発経過

GSR 効果⁽¹⁾は、アモルファス磁性ワイヤに検出コイルを巻き付け、そのワイヤに GHz に相当するパルス電流を通電し、最表面の電子スピンの超高速に円周方向に回転することにより、想定外の大きな出力特性を生み出す現象である。アモルファスワイヤを用いた高感度磁気センサである MI センサ(Magneto-Impedance の略)センサの改良過程で発見されたものであるので、まず MI センサの開発とその特性について説明⁽⁷⁾⁽¹³⁾する。

アモルファスワイヤは 80 年代前半に東北大教授(当時)増本教授によって発明され、理想的な磁性材料として磁気センサへの応用研究が取り組まれた。その過程で 93 年名古屋大学の毛利教授(当時)によって 1MHz から 100MHz の範囲の高周波電流の下で大きな磁気インピーダンス効果 (図 1) を発見した。その後パルス励磁、負帰還回路、コイル検出式⁽¹³⁾など電子回路の改良が続き、高感度で直線性に優れた MI センサの開発が開発されるに至った。97 年には日本科学技術振興財団 (略称 JST) によって MI センサコンソーシアムが組織され本技術は広く普及していった。なお、海外の Makhotkin⁽⁶⁾らは 90 年アモルファスリボンを使って MI 効果を毛利らに先立って発見し MI センサを試作した。この分野の草分け的研究であった。

2000 年以降、薄膜タイプとワイヤタイプの二つの方向で開発が取り組まれた。薄膜 MI センサの製作は容易であったが、感度はワイヤタイプよりも 1/10 程度劣っていた。ワイヤタイプは、愛知製鋼が開発した小型 MI 素子と IC タイプの MI センサがスマホ用の電子コンパスに採用され、11 年には年 6000 万個以上生産された。MI センサ開発のこの成功を踏まえて、超高感度マイクロ磁気センサのさらなる向上を目指して研究が活発化していった。

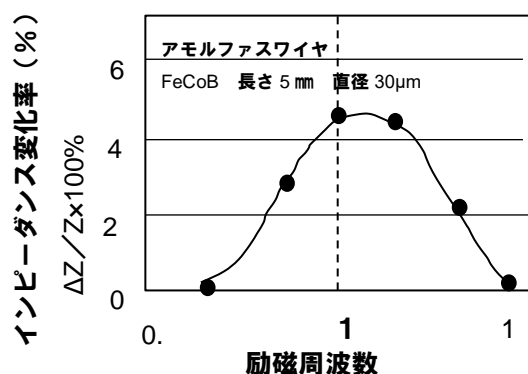


図 1 MI センサの出力の励磁周波数依

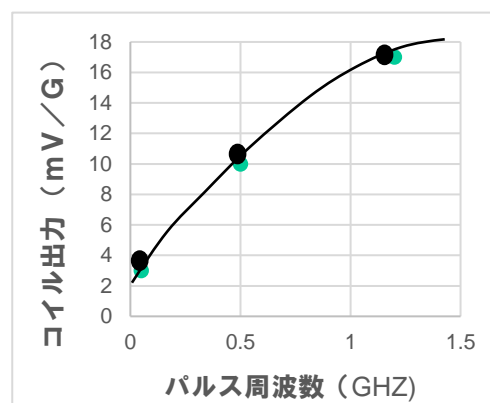


図 2 GSR センサのパルス周波数依存性

1.2 MI センサの周波数依存性の研究から GSR センサの発見⁽²⁾

著者らは、コイル式の MI センサにおいてコイルの出力電圧は、100MHz でも低下しないという MI 効果の基本特性に反する事実を確認した。より高周波域の GHz パルスで励磁した場合のワイヤ最表面に起こる電磁現象について研究^{(3)・(5)}を始めた。その結果、1.5GHz においてもコイル電圧は大きくなる事実 (図 2) を突き止めた。さらに MI センサ磁界依存性はアモルファスワイヤの磁化曲線に対応するが、GHz 域ではコイル出力は外部磁界に対して正弦波関数関係にある (図 3) ことを発見した。

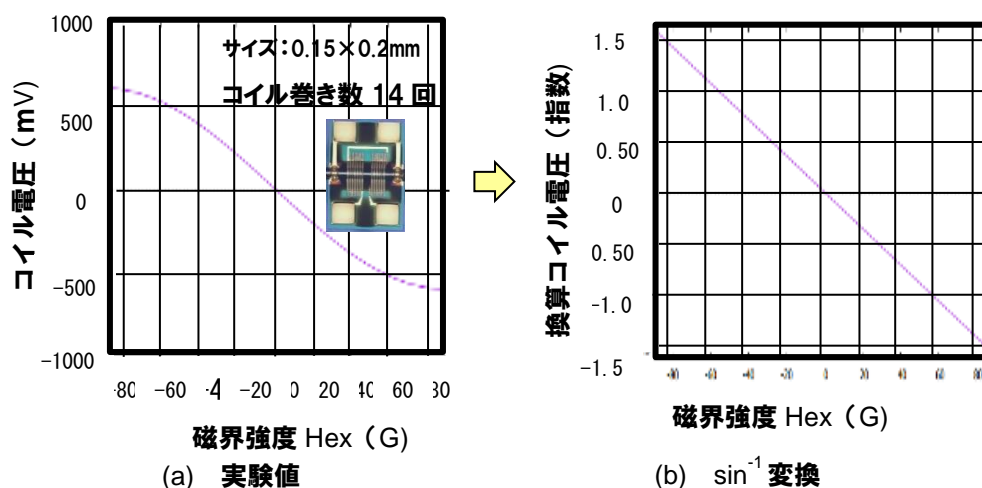
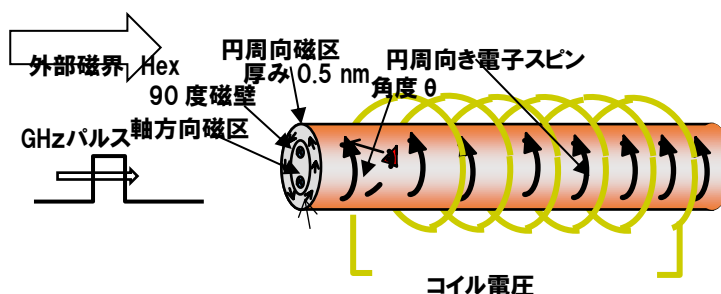


図 3 GSR センサのコイル電圧の磁界依存性

MI 効果は、図 4 に示すようにアモルファスワイヤの円周方向磁区⁽¹⁴⁾とコア部の軸方向磁区の界面に存在する 90 度磁壁が交流磁界の力で振動⁽⁸⁾しコア部の磁化が円周方向に回転する。その際に円周方向の透磁率が外部磁界に比例して大きくなり、その結果表皮効果が著しく増加してワイヤのインピーダンスが磁界に依存して著しく増加する現象である。励磁周波数が大きすぎると磁壁の移動が渦電流によってブレーキを掛けられ MI 効果が出現しない。その結果、MI 効果は 10MHz 周波数の励磁電流で最大値⁽¹²⁾を示す (図 1)。

これに対して GHz パルスの場合、電流の通過する表皮深さが $0.2\mu\text{m}$ 程度と 10MHz に比べて 1/10 となり、GSR 効果の電磁現象 (図 4) は GHz パルスによる最表面に存在する電子スピンの高速回転のみに限定されるようになる。この考えに立つと、先に述べた二つの新事実はよく説明ができる。このことからこの新しい電磁現象を GSR 効果と命名した。



2. GSR センサの特徴と基本技術

2. 1 GSR 素子の製造法 (3次元フォトリソグラフィー技術を開発)

GSR センサの基本構造は、GSR 素子とパルス駆動の信号処理回路からなっている。GHz パルスが生み出す最表面の電子スピン回転による非常に小さな電磁現象に限られる。その小さな信号を検知するためにマイクロコイルの製作技術の開発（図 5）から始めた。

Si 基板に深さ $6\mu\text{m}$ 、幅 $20\mu\text{m}$ の溝を形成し、その溝底面に沿って下側コイルのパターンニングを行う。そこに直径 $10\mu\text{m}$ のガラス被覆されたアモルファスワイヤを配置し、レジストで被覆しキュア処理をして固定する。その上に上側コイルをパターンニングしてマイクロコイルを形成し、コイル両端をコイル端子とする。次に電極部のガラスの一部を取り除いてワイヤ端子とする。最後に各端子と素子の電極との配線を施す。下側コイルの拡大写真とマイクロコイルの断面写真を図 6 示す。3 次元フォトリソグラフィ技術による凹凸面上の微細配線の様子がよく観察できる。

製作した GSR 素子の一例の写真（図 15(b)）を示す。大きさは、コイルとワイヤの間隙は $3\mu\text{m}$ 、内径は $16\mu\text{m}$ 、コイルピッチ $5\mu\text{m}$ 、2 本のワイヤ間隔は $50\mu\text{m}$ である。

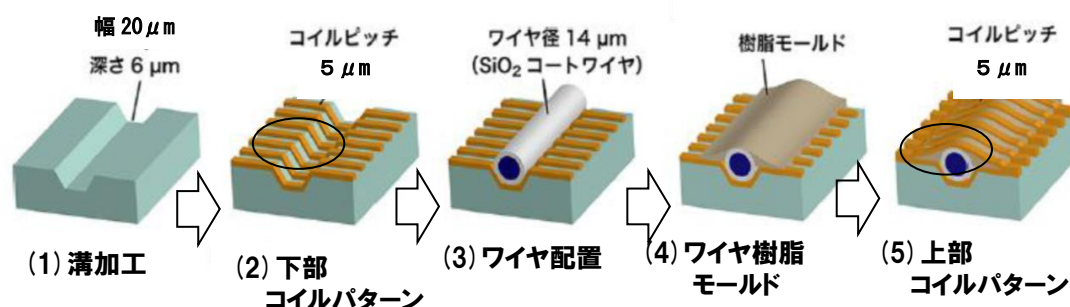
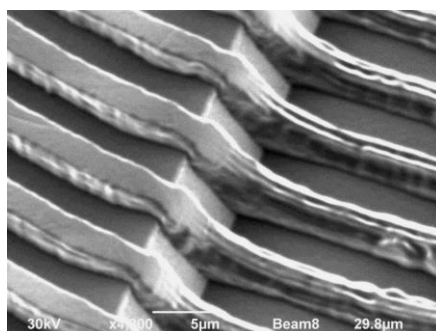
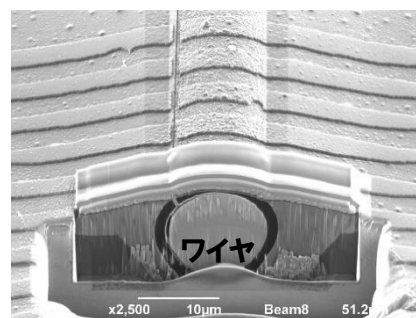


図 5 GSR 素子の製造プロセス



(a) 溝下部コイルの拡大写真



(b) ワイヤ上部コイルの拡大写真

図 6 3 次元フォトリソ技術（拡大写真部）

2. 2 GSR センサの基本特性

2. 2. 1 周波数、コイル巻き数、磁性材料特性に対する依存性⁽⁵⁾

GSR 素子のパルス周波数の影響について説明する。パルス発信回路で発生させた GHz パルスをワイヤに通電し、その際に生じるコイル出力を高速オシロスコープで観察した。図 7 は、ワイヤに通電したパルス波形とパルス電流の立上り・立下り時のコイル電圧の出力波形を示している。パルスの立上りと立下りの両時点でコイルに急峻な電圧波形が発生する。こ

の電圧の最高値と磁界強度が比例関係にある。なお、パルス周波数は立ち上がり時間 Δt から $f = 1/2 \Delta t$ として定義した。

外部磁界を $\pm 10\text{G}$ 変化させてコイル出力感度 (mV/G) を測定したところ、図 2 に示すように 0.06GHz から 1.2GHz へと増加させると、感度が 3mV/G から 17mV/G へと 5 倍増加した。さらに 2GHz まで増加しても感度の低下は見られなかった。

次に磁気検出感度のコイルの巻き数依存性を説明する。巻き数を 16 回、42 回、420 回と変えて試験した結果、図 8 に示すように、コイル巻き数に依存して増加するが、著しく多い巻き数では感度上昇は抑制されるようである。

アモルファスワイヤの磁気特性の影響を図 9 に示す。透磁率が増加すると磁界感度が比例的に増加する。また異方性磁界 H_k と感度の最大値を示す磁界 H_m とはほぼ一致する。



図 7 パルス通電時のワイヤ・コイル波形

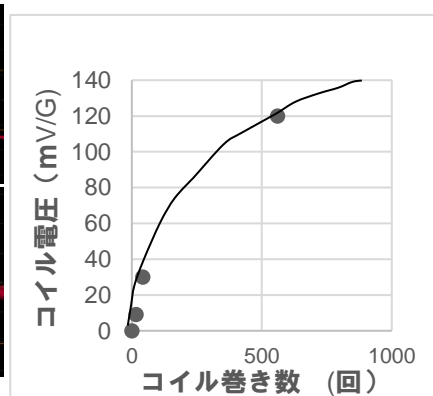


図 8 コイル巻き数の影

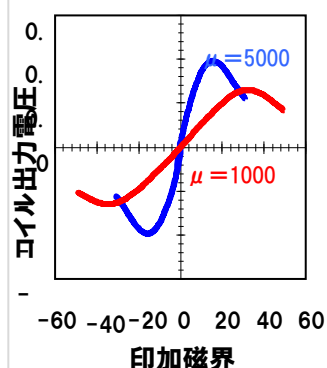


図 9 磁性ワイヤの透磁率の

2. 2. 2 磁気感度と磁界との関係^②

GSR センサ出力感度の磁気感度依存性は、驚くべきことに正弦波特性 (図 3) を示す。一方 MI センサのそれは磁性材料の磁化過程における磁壁の移動に起因するので数学的な関係式を示さず、大きな違いとである。

出力電圧 V は、その最大値を示す磁界 H_m 、角度 $\phi = \pi H/2H_m$ とすると、 $V = V_0 \cdot \sin \phi$ (式 1) となる。ここで H_m はワイヤの異方性磁界 H_k にほぼ等しい。厳密には $0.96H_k$ である。最表面の電子スピンは円周方向の異方性磁界 K_θ によって円周方向に整列している。そこにワイヤ軸方向に磁界 H がかけると反磁界を考慮した内部磁界 H_{in} がかけると、電子スピンは、 $\tan \theta = H_{in}/H_k$ だけ傾く。周波数 $f = 2\pi \omega$ のパルス電流で電子スピンの回転すると、コイル出力は軸方向の電子スピン強度 $S \cdot \sin \theta$ と軸方向向きの速さ $f \cdot \cos \theta$ に比例し、 $V = V_0 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta = V_0 \sin 2\theta$ (式 2) となる。

θ は H_k の関数、 ϕ は H_m の関数であるが、 H_k と H_m は $H_m = 0.96H_k$ の関係が存在し、 $2\theta = \phi$ となることが証明できる。GHz パルスによるコイル出力の正弦波特性は最表面の電子スピンの影響のみで説明することができる。

3. GSR 現象のメカニズム

GHz パルスによるワイヤ内部の電子スピンの動きとコイル出力との関係について、LLG 方程式を使って検討した上原らの研究⁽¹⁵⁾を紹介する。方程式は、図 10 に示すように円柱座標系で表示した LLG 方程式と Maxwell 方程式を連成したものである。

コンピュータシミュレーションの計算結果と実験値との適合度を調査し、計算方法の有

効性を確認した。外部磁界の強さを変えてコイル電圧を計算した。その結果、図 11 に示すように実験コイル波形と良く一致した。両者は、いずれも立ち上がりパルス出力の方が立下りのそれより高くなっている。これらのデータから磁界感度と磁界との依存性を調べたところ、正弦波関数関係にあることが確認できた。

Manifold equation with LLG eq. and Bessel eq.

LLG equation

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{H} - \frac{\alpha\gamma}{M} \mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H})$$

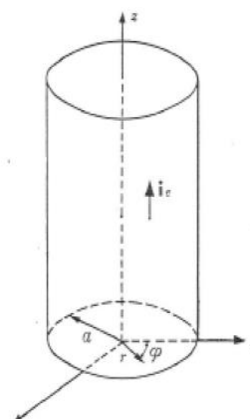
$$\mathbf{H} = -\frac{\partial E_{tot}}{\partial \mathbf{M}} = -\frac{\partial E_{ani}}{\partial \mathbf{M}} - \frac{\partial E_{mag}}{\partial \mathbf{M}} - \frac{\partial E_{exc}}{\partial \mathbf{M}} - \frac{\partial E_{ext}}{\partial \mathbf{M}}$$

E_{ani} : Magnetic anisotropy energy

E_{mag} : Magnetostatic energy

E_{exc} : Exchange energy

E_{ext} : Zeeman energy



Bessel equation applied to high frequency current passed through the wire

$$\frac{\partial^2 H_\phi(r, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_\phi(r, t)}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 H_\phi(r, t)}{\partial \phi^2} = \sigma \frac{\partial B_\phi(r, t)}{\partial t}$$

図 10 Micro-Magnetics シミュレーションによるワイヤ内部の磁界解析

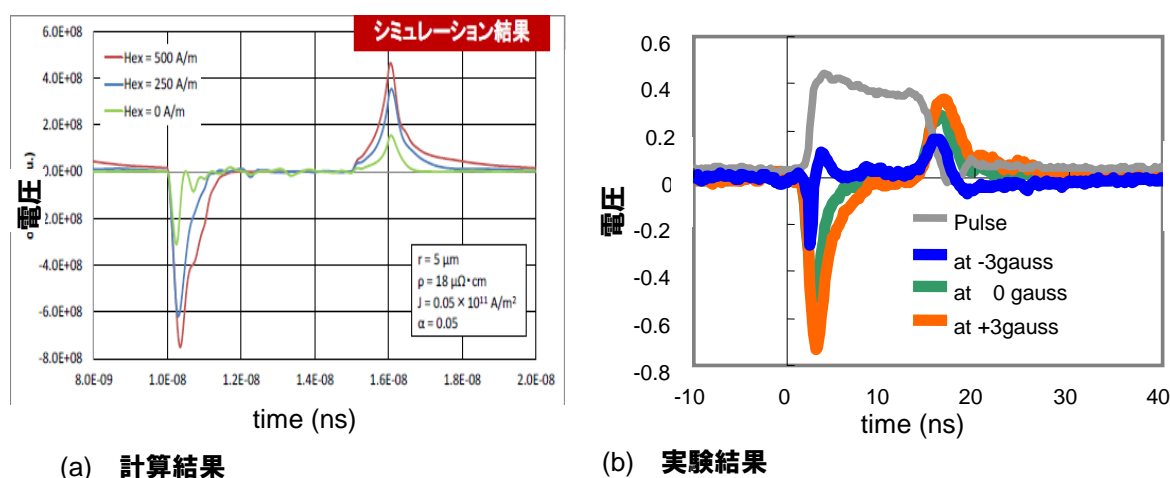


図 11 シミュレーション計算結果と実験

さらに周波数依存性について調査した結果、1.5GHz で良好な感度を示し、それ以上の高周波域では飽和傾向を示した。FG センサや MI センサは、磁壁移動とそれに伴う渦電流ブレーキのため、周波数が、FG センサは 30 KHz 以上で、MI センサは 100MHz 以上で感度は低下をする。GSR センサは電子スピン回転を本質としているため 1.5GHz 以上でもスピン回転は惹起され低下傾向を示さない。以上の解析結果は、GHz パルスによるワイヤとコイルとに惹起され電磁現象は GSR 現象であることを示唆している。

さらに GSR センサは、電子スピンの回転のみを検知すると想定すると、磁気ノイズは理論的に 0.01pT レベルと予測できる。実際の磁気センサは、コイルや電子回路のノイズに支配さ

れるが、センサの開発目標としてこの理論的示唆は重要だと思う。

4. GSR センサの開発の現状

4. 1 GSR センサの基本性能⁽⁵⁾

GSR センサの電子回路（図 12）の特徴は、GHz パルス発振器と検出コイルの電圧をバッファ回路を介して信号処理する点である。実際に基板タイプ（図 13(a)）と ASIC（図 13(b)）を製作し、GSR センサの基本特性を調査した。使用した GSR 素子は、2 本ワイヤ、コイル巻き数 42 回、サイズは幅 0.20 mm、幅 0.25 mm のもの（図 6(c)）である。ASIC と組み合わせた GSR センササンプルの特性は、図 14 に示すように感度は 33mV/G 、測定レンジは $\pm 40\text{G}$ 、直線性は 0.5% 以下、および σ ノイズ（磁界検出力）は 1KHz バンド幅の下で 0.35mG 、16 ビット出力であった。MI センサ（AMI306）に比較して、磁界検出力で 6 倍、測定レンジで 3.3 倍、素子サイズは 1/5 で、性能的には 100 倍以上凌駕していることがわかる。

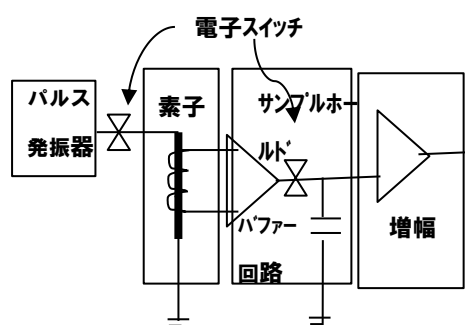


図 12 GSR センサの基本回路

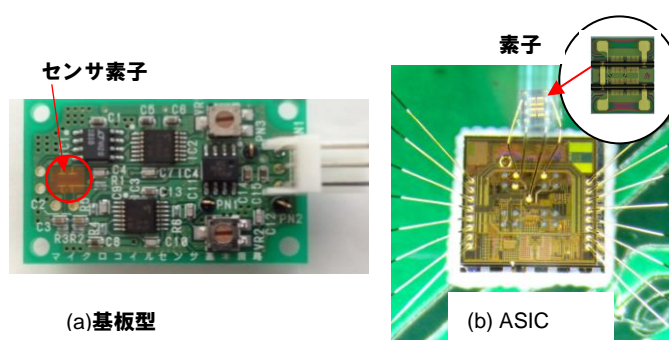


図 13 GSR センサの基板型回路

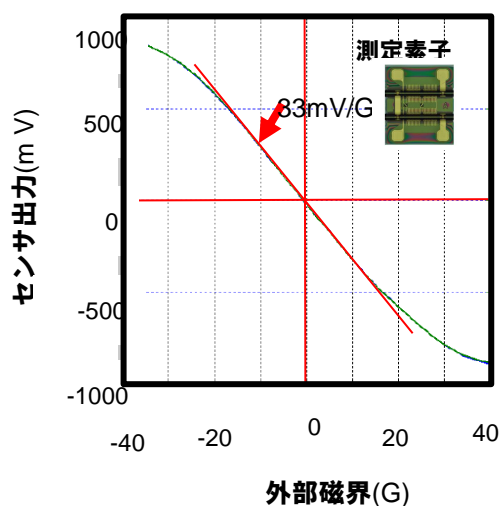


図 14 GSR-IC センサの磁界依存性

4. 2 商品開発の現状

GSR センサは、最も有望な超高感度マイクロ磁気センサとして、無人運転自動車、ナビゲーション、モーションセンサ、生体磁気検出装置、生体内モバイル機器など多方面の IOT 分野で商品開発が進められている。用途に応じて図 15 に示すような GSR 素子を試作して用途に対応した GSR センサ開発の取り組みを行っている。

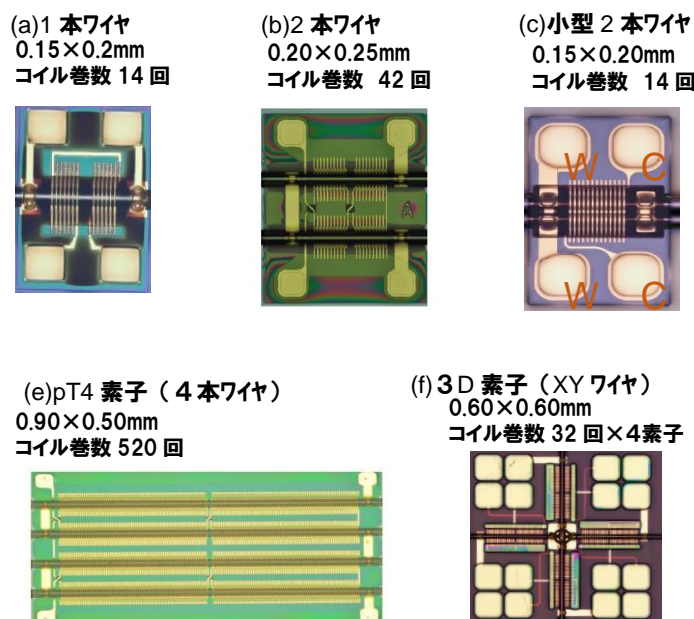


図 15 用途に応じた各種 GSR 素子

4. 2. 1 自動車用 GSR センサの開発

無人運転車の開発が注目を集めている。運転手の代わりに人工知能で、微妙なハンドルさばきやアクセル・ブレークの微妙な制御を保証するためには、磁気センサの高速化・高精度化が必要となる。実はハンドル、ブレーキなどの回転角やモータや車輪などの回転速度およびモータの動きを監視する電流センサなど、自動車の運動性能に関するセンサとして主に磁気センサが使用されているからである。現在 12 ビットから 16 ビット (性能 16 倍) で、高速測定が可能な磁気センサの開発が進められている。

マグネデザイン(株)は、図 15(a)に示す自動車用 GSR 素子を試作し、ASIC と組み合わせるその性能を評価した。素子の長さを 0.15 mm と小さくして、測定レンジを自動車用途が要求する $\pm 80\text{G}$ 以上に拡大することを目指した。測定の結果、測定レンジ $\pm 90\text{G}$ 、磁界感度 10mV/G 、 σ ノイズ $2\text{mG} @ 1\text{KHz}$ 、出力分解能 16 ビットの性能を得た。また熱サイクル試験を行い、その結果 2000 回以上の耐久性を確認した。なお MI センサは測定レンジ⁽¹¹⁾⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾が $\pm 12\text{G}$ と低く、 $\pm 80\text{G}$ 以上が必要な自動車用途には不向きであった。

4. 2. 2 3次元電子コンパスと磁気ジャイロ⁽¹⁸⁾

ウェアラブルコンピュータなど携帯端末デバイスには、電子コンパス、加速度センサ、MEMS ジャイロセンサの 3 つのセンサを一体にしたモーションセンサが標準装備されている。MEMS ジャイロは振動や超音波で誤差が出やすいので、振動の影響を受けない磁気ジャイロとの併用が望まれている。磁気ジャイロは標準装備されている電子コンパスの磁気データ H_0 を、磁気ジャイロ方程式により回転速度 ω に変換したものである。磁気ジャイロの基本方程式は、 $\omega = (H_0 \times \Delta H) / H_0^2 \times \Delta t$ となる。式からわかるように測定速さ Δt を高速に、磁界検出力 ΔH を微細にすることで計算が可能となる。具体的には 1m 秒以下で検出力 0.5mG 以下の GSR センサの開発が目標である。

電子コンパス用の 3 次元素子 (図 15(f)) の大きさは $0.6\text{mm} \times 0.6\text{mm}$ 、X 軸と Y 軸に沿って 4 個の GSR 素子が配置されている。基本特性は測定レンジ $\pm 36\text{G}$ 、磁界感度 33mV/G 、 σ ノイズ $0.5\text{mG} @ 1\text{KHz}$ であった。3 次元素子はワイヤの両端に Z パーマロイ軸方向の磁界

を集磁するパーマロイ部品が取り付けられて 3 次元磁界検出素子が試作されている、その完成が待たれる。

4. 2. 3 Medical 応用⁶⁾

医療分野では、心電図や脳波診断に補完する心磁図、脳磁図診断法が注目されている。これは超電導技術をベースにした超高感度磁気センサ SQUID で生体磁気を検知して行う新技術である。しかし MRI 並みの大型装置であるため、室温で心電図並みに使用できるハンディ化と小型化が求められている。図 15(e)に示す pT 素子が試作され、1nT レベルの磁界検出力が実現している。

また胃カメラ、カテーテル、血管内視鏡など生体内モバイル医療機器の先端に磁気センサを内蔵し、その位置と方位を計測して装置のナビゲーション技術の開発が進んでいる。これらの超小型機器に内蔵可能な、つまり幅 0.2 mm 以下、長さ 1 mm 以下、厚み 0.10 mm 以下の超小型高感度磁気センサの開発が進んでいる。GSR センサを使った開発では、図 15 (c) に示す 1 本のコイル内に 2 本のアモルファスワイヤを挿入して高感度と小型化を実現する技術開発がすすんでいる。また図 16 に示すように GSR 素子を ASIC 表面の保護被膜 (7 μm 程度) に溝を形成しそこに GSR 素子を作製し、ASIC 素子を一体化して小型化を図る技術開発も進んでおり、カテーテル先端に内蔵可能な超小型高感度磁気センサの実現が来たされる。

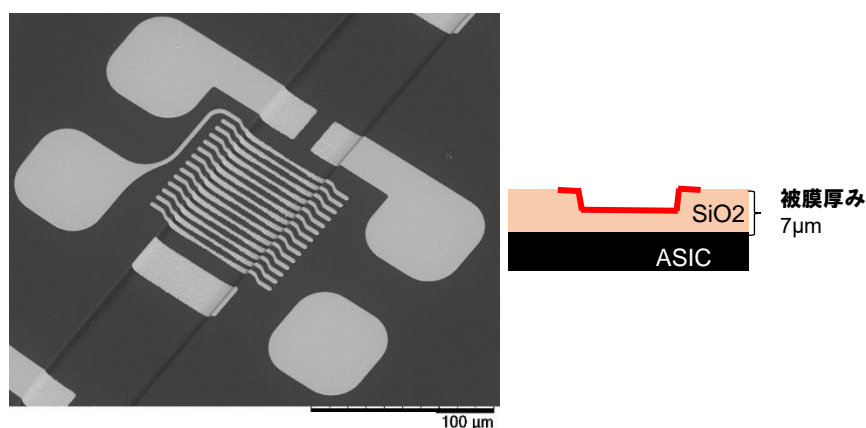


図 16 ASIC 面保護被膜内に GSR 素子を形成

まとめ

GSR センサは、GHz パルスによるアモルファスワイヤの最表面の電子スピンの回転を検出コイルで検知するものである。2015 年に発見されたばかりで、3 次元フォトリソグラフィ技術によるマイクロコイルの作製と GHz パルス回路を技術的基盤としており、その要素技術の基礎研究は始まったばかりである。コイルの微細化は、コイルピッチは 30 μm から 5 μm 、ワイヤ整列間隔も 400 μm から 20 μm 、と微細化している。将来コイルピッチは 0.5 μm 、ワイヤ整列間隔は 12 μm レベルの微細化が実現すると思われる。GSR センサに適合した GHz パルス回路の研究が必要と思われる。

IOT 時代を迎えて自動車分野、スマート時計などのデジタルモバイル機器、医療分野など超高感度マイクロ磁気センサのニーズが高まっており、GSR センサを活用した画期的な磁気センサの商品開発が期待されている。

[参考文献]

- (1) Webllio 辞書 ; GSR センサ
- (2) 本蔵義信 ; 特許第 5839527 号 (2015)
- (3) 本蔵義信 ; 第 1 回 MSJ 超高感度マイクロ磁気センサ専門研究会テキスト p1-9 (2015)
- (4) Y.Honkura : IWMW2015 abstracts p21 (2015)
- (5) 本蔵義信 ; 第 4 回 MSJ 超高感度マイクロ磁気センサ専門研究会テキスト p10-15 (2016)
- (6) V.E.Makhotkin etc; Sensor and Actuator A,27(1991)p759-762
- (7) K.Mohri, K,Kawashima, T.Kohzawa, and H.Yoshida: IEEE Trans.Magn., V29, p1245-1248(1993)
- (8) 毛利佳年雄 ; 「磁気センサ理工学」、コロナ社 (1998)
- (9) 毛利佳年雄監修 : 「新しい磁気センサとその応用」、トリクックス社 (2013)
- (10) 本蔵義信 ; 日本テクノセンタ講習会 「アモルファス MI センサの特性と応用」 (2002)
- (11) 本蔵義信 ; 日本テクノセンタ講習会 「MI センサを応用した電子コンパスと携帯電話への応用」 (2002)
- (12) 武士田健一 : 学位論文 (1997)
- (13) 毛利佳年雄 ; 特許第 3645116 号(1999)
- (14) F.B.Humphrey,K.Morri,J.Yamasaki,H.Kawamura,R.Malmhall,.Ogasawara,Proc.ofSymp.onMagnetic Properties of Amorphous Metala,PP.110-116(1987)
- (15) 上原裕二ほか : 第 1 回 MSJ 超高感度マイクロ磁気センサ専門研究会テキスト p15-21 (2015)
- (16) Y.Honkura;;III Joint Magnetic Symposium(JEMS2006)
- (17) Y.Honkura; The Development of MI sensor and its Applicatins to Mobile Pone; AES2012,(2012)
- (18) 本蔵義信、小川一夫 ; MI センサを使った磁気ジャイロの開発、MSJ 札幌大会、5pF-6 (2013)